

联合哨兵卫星系列雷达与光学影像的洞庭湖水域面积变化高时空分辨率监测

宋利娟^{1,2}, 景海涛¹, 徐嘉慧^{1,2}, 陈探², 张大鹏^{1,2}, 宋春桥²

1. 河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 焦作 454000;

2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 流域地理学重点实验室, 南京 210008

摘要: 洞庭湖是中国第二大淡水湖, 干湿季节水体波动幅度大、频率高。卫星高频观测洞庭湖水体变化对及时、准确地监测其水文动态变化具有重要意义。本研究利用 Sentinel-1 和 Sentinel-2 影像 (10 m), 在兼具高时频与空间分辨率条件下重建和分析 2017 年—2020 年洞庭湖水域面积的精细时序信息。此外, 本研究拟创建一种基于湖区部分清晰影像来重建全湖水域面积的方法。该方法利用湖区某个区块面积与 Sentinel-1 全幅影像提取的湖泊面积构建的统计拟合关系建立经验模型, 从而得到更密集的洞庭湖水域面积时间序列。拟合结果显示, 每个区块的面积与总面积呈显著正相关, 平均 R^2 值为 0.94。将 2017 年—2020 年获取的 119 景 Sentinel-1 影像和 38 景 Sentinel-2 影像用于提取洞庭湖区块水体淹没范围, 以重建整个湖区面积。结合 Sentinel-1 和 Sentinel-2 影像, 平均每个月可获取的观测影像为 6 景, 某些月内监测次数可达 10 次, 时间间隔为 3—6 d。此外, 本研究重建的水域面积时间序列可以精确地刻画显著的季节波动和年际变化, 水域面积在 7 月达到峰值, 11—2 月达到谷值。研究发现一个月内最大面积与最小面积的平均比率为 1.36; 地表水域最剧烈的波动发生在 11 月, 比率为 1.52。整合 Sentinel-1/2 影像确定, 2017 年—2020 年洞庭湖的平均水域面积约为 1147.13 km²。与基于 Sentinel-1/2 影像构建的洞庭湖水域面积时间序列相比, 结合 Landsat 8 影像的水体面积时间序列能够在某些月将水体观测的时间分辨率提高, 但是对于水域面积的月均值和年均值影响较小。综上, 本研究联合高时空分辨率的哨兵系列雷达与光学影像发展高时频水域面积序列的精细提取方法, 可为提升洞庭湖及长江中下游高动态湖泊水域遥感监测和水资源精细管理提供科技支撑。

关键词: 遥感监测, 洞庭湖, Sentinel, 水域面积, 时间序列, 长江流域

中图分类号: P2

引用格式: 宋利娟, 景海涛, 徐嘉慧, 陈探, 张大鹏, 宋春桥. 2023. 联合哨兵卫星系列雷达与光学影像的洞庭湖水域面积变化高时空分辨率监测. 遥感学报, 27(11): 2516–2529

Song L J, Jing H T, Xu J H, Chen T, Zhang D P and Song C Q. 2023. High spatial and temporal resolution monitoring of water area changes of Dongting Lake by joint Sentinel satellite series of radar and optical images. National Remote Sensing Bulletin, 27(11): 2516–2529 [DOI:10.11834/jrs.20221562]

1 引言

湖泊是淡水资源的重要组成部分, 在调节河川径流、提供生活水源和维持生态平衡等方面发挥作用 (宋春桥等, 2020; Wang等, 2014; 马荣华等, 2011; 王桥, 2021)。近年来, 在全球气候变暖和人类活动不断增强的共同影响下, 大多数湖泊都呈现不同程度的扩张或萎缩 (Pekel等,

2016; Cai等, 2016; 杨桂山等, 2010; 谭志强等, 2017)。对湖泊进行高时空分辨率制图和动态监测, 对于管理区域水资源和理解湖泊水文与气候变化的关系具有重要意义。目前, 可获取的遥感卫星种类和数量不断增加, 遥感监测已经成为地表水变化监测的重要技术手段。与传统的实地测量相比较, 遥感技术具有成本低、范围广和更新快的优势 (Yang等, 2017; 高耶等, 2019; 岩

收稿日期: 2021-08-03; 预印本: 2022-02-14

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2018YFD0900804, 2018YFD1100101, 2019YFA0607101); 国家自然科学基金 (编号: 41971403, 41801321); 国家“人才引进项目”青年项目 (编号: Y7QR011001); 中国科学院战略性先导科技专项 (A类) (编号: XDA23100102)

第一作者简介: 宋利娟, 研究方向为水文遥感的理论和应用。E-mail: lijuansong88888@163.com

通信作者简介: 宋春桥, 研究方向为湖泊、流域水文遥感、资源环境遥感与全球变化。E-mail: cqsong@niglas.ac.cn

腊等, 2020)。

作为中国第二大淡水湖泊, 洞庭湖是长江中游重要的调蓄湖泊, 在调节长江径流、保持生物多样性和发展区域经济等方面具有举足轻重的作用 (Yang 等, 2021; Li 等, 2018)。洞庭湖流域降水的季节变化十分显著, 使得湖区的水体动态变化周期明显、幅度较大 (杜涛等, 2012; 李景刚等, 2009; 谢文君等, 2017; Wang 等, 2022)。目前, 大量研究利用 MODIS 影像和 Landsat 影像开展洞庭湖水体变化的遥感监测, 由于光学影像易受到恶劣天气影响, 导致可用影像数量减少, 大多数研究集中在长时序的年际或月度水域面积变化研究。例如, 李景刚等 (2010) 利用 MODIS 数据产品对 2000 年 3 月—2008 年 12 月间洞庭湖区水域面积的变化特征和趋势进行了监测和分析; 成功等 (2015) 使用监督分类方法从 Landsat 影像中提取 1996 年—2014 年洞庭湖主要水域面积信息, 结合该区域的气候和经济发展对水域面积变化的影响进行探讨。上述研究为深入了解洞庭湖水文动态做出了重要贡献。然而, 由于 MODIS 影像空间分辨率较低, 为 250 m, 存在混合像元的影响, 导致水体提取精度偏低; Landsat 影像具有 30 m 的空间分辨率, 但是时间分辨率较低, 且容易受到云雾雨雪等恶劣天气的影响, 无法用于监测洞庭湖水体的年内及月内动态变化 (Li 等, 2021; Yang 等, 2020; 王诗蕾等, 2021; 余姝辰等, 2019; 张猛等, 2017)。Sentinel-1 雷达卫星全天候、全天时不间断运行, 不易受到天气和云层的影响, 便于连续监测湖泊水域范围, 特别是对于属于季风气候区的洞庭湖。已有研究利用 Sentinel-1 影像对洞庭湖进行水域面积变化监测, 例如: 李军等 (2020) 选择 2017 年 6 月 4 日、6 月 28 日、7 月 10 日以及 7 月 22 日等 4 期 Sentinel-1 影像, 对洞庭湖区域进行了洪涝灾害信息的提取与分析; Xing 等 (2018) 使用 Sentinel-1 影像生成 10 m 分辨率的 2016 年洞庭湖月度地表水范围, 分析了年内地表水动态; Zhu 等 (2019) 利用 Sentinel-1 影像提取水体范围, 分析了 2015 年 6 月—2019 年 3 月洞庭湖水域月度面积变化。这些探索性研究多是对洞庭湖进行多时相或者月尺度水域面积变化分析, 但未能在较长时间序列中捕获月内水域范围动态变化的细节信息。因此, 本研究拟利用哨兵系列卫星的多传感器特征, 集成雷达与光学影像各自

的优势, 构建 10 m 分辨率的更高时频湖泊水域面积变化的遥感监测方案, 深入了解洞庭湖水域面积变化情况。

因此, 本研究的主要目标如下: (1) 基于高时空分辨率的 Sentinel-1 影像构建 2017 年—2020 年洞庭湖水体淹没面积的密集时间序列; (2) 提出一种通过利用某个区块面积与 Sentinel-1 全幅影像提取的湖泊面积的统计拟合关系建立经验模型重建完整湖泊面积的方法, 从而加密湖泊水体面积时间序列; (3) 联合完整提取的 Sentinel-1/2 面积和借助区块拟合的 Sentinel-1/2 面积数据, 重建湖泊水域面积密集时间序列, 开展洞庭湖 2017 年—2020 年时段的年内和年际水体变化的精细分析。本研究旨在利用有效的遥感数据重建高时空分辨率湖泊水域面积变化时间序列, 增进对洞庭湖水文状况的科学理解。

2 研究区概况与数据源

2.1 研究区概况

洞庭湖 (112° 06' E—113° 09' E, 28° 42' N—29° 32' N) 位于长江中游荆江段南岸, 是目前与长江依旧保持自然连通的两大湖泊之一, 由东、西、南洞庭湖 3 个湖区组成 (图 1)。洞庭湖北面以松滋、太平、藕池 (三口) 分泄长江水入湖, 西南面承纳湘、资、沅、澧 (四水) 及汨罗江等小支流。该湖泊经治理和调蓄后, 由城陵矶分泄湖水排入长江。洞庭湖区的年平均气温 16.8 °C, 月平均气温 5.8 °C—27.3 °C (黄菊梅等, 2013)。受亚热带季风气候的影响, 洞庭湖面积季节性变化十分显著, 水域面积在 7—8 月最大, 在 11 月—次年 2 月为最小 (王威等, 2020; Yang 等, 2020)。自 2003 年三峡大坝运行以来, 洞庭湖的水文特征发生了巨大的变化, 调节江河径流和蓄水防洪的能力正不断减弱。为了更加全面地了解洞庭湖的变化规律, 对洞庭湖的湖区面积进行更高时间、空间分辨率遥感监测具有十分重要的意义。

2.2 数据源

GEE (Google Earth Engine) 云平台具有庞大的遥感影像数据集和高性能的计算能力, 为快速地进行遥感数据分析提供了一种新途径 (Gorelick 等, 2017; Tamiminia 等, 2020)。本研究采用集成

在 GEE 数据库中的 Sentinel-1 雷达影像, Sentinel-2 和 Landsat 8 光学影像作为研究数据, 进行洞庭湖水域面积的提取和重建。2017 年—2020 年的 Sentinel-1、Sentinel-2 和 Landsat 8 卫星的影像数量和良好的观测数量如表 1 所示。

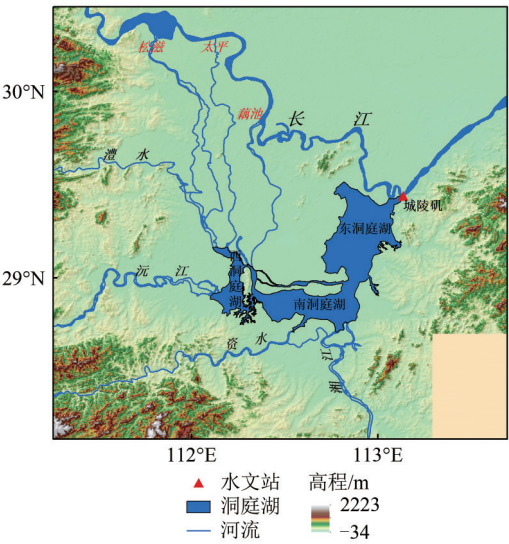


图1 研究区概况图

Fig. 1 Overview map of the study area

表1 Sentinel-1、Sentinel-2 和 Landsat 8 的影像信息和数量统计

Table 1 Image information and number statistics of Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat 8

卫星	波段	分辨率/m	重访周期	影像数目				良好观测的影像数目			
				2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
Sentinel-1 F	VV	10	6/12	29	29	30	25	29	29	30	25
Sentinel-1 P	VV	10	6/12	30	31	30	30	29	31	29	30
Sentinel-2	B3, B8	10	5/10	32	67	73	72	15	18	24	19
Landsat 8	B3, B5	30	16	23	30	25	24	13	13	10	12

Sentinel-2 由 2015 年 6 月 23 日发射的 Sentinel-2A 和 2017 年 3 月 7 日发射的 Sentinel-2B 两颗卫星系统组成 (European Space Agency, 2015; Drusch 等, 2012)。每颗 Sentinel-2 卫星都搭载一个多光谱成像仪 MSI (Multi-Spectral Instrument), 可提供 13 个光谱波段, 波长范围 440—2200 nm (Vuolo 等, 2016)。一颗卫星时间分辨率为 10 d, 两颗卫星组合后可以形成 5 d 的重访周期, 包含 10 m、20 m 和 60 m 等 3 种不同的地面空间分辨率。本研究选取 Sentinel-2 影像内空间分辨率均为 10 m 的 B3 (Green) 和 B8 (NIR) 波段进行水域范围提取。一景 Sentinel-2 影像可以将洞庭湖完全覆盖, 但是光学影像容易受到云雨等恶劣天气的影响, 导致可用影像数量较少。

Landsat 8 是在 2013 年 2 月 11 号发射成功的地球观测卫星, 是 Landsat 系列的第八颗卫星

Sentinel-1 由 2014 年 4 月 3 日发射的 Sentinel-1A 和 2016 年 4 月 25 日发射的 Sentinel-1B 两颗卫星系统组成, 属于主动式微波遥感卫星 (Torres 等, 2012; Li 等, 2018)。单颗卫星重访周期为 12 d, 两个卫星互补的重访周期为 6 d, 空间分辨率为 10 m×10 m。Sentinel-1 携带 C 波段合成孔径雷达 SAR (Synthetic Aperture Radar), 提供 VV 和 VH 两种极化方式。已有地表水提取研究表明, VV 极化用于水体提取具有更精确的结果 (Twele 等, 2016; Markert 等, 2020)。因此, 本研究仅采用 VV 极化数据进行水域范围提取。Sentinel-1 覆盖洞庭湖的影像可分为两种类型: 一种是完全覆盖洞庭湖的 Sentinel-1 影像 (简称为 Sentinel-1 F), 用于提取整个湖区的面积, 时间分辨率多为 12 d, 由于存在影像缺失的情况, 导致某些观测日期间隔>12 d; 另一种是部分覆盖洞庭湖的 Sentinel-1 影像 (简称为 Sentinel-1 P), 不能应用于洞庭湖区域水体变化的研究, 但是可以用于提取洞庭湖的部分区域的水体面积。Sentinel-1 F 和 Sentinel-1 P 在洞庭湖的覆盖情况如图 2 (b)—(c) 所示。

(Wulder 等, 2019)。Landsat 8 卫星携带陆地成像仪 OLI (Operational Land Imager) 和热红外传感器 TIRS (Thermal Infrared Sensor), 卫星重访周期为 16 d。OLI 包括 9 个波段 (B1—B9), 其中有一个全色波段 B8 (15 m), 其他波段空间分辨率为 30 m; TIRS 包括两个 100 m 的 TIR 波段 (B10—B11) (Loveland 和 Irons, 2016)。本研究选取 Landsat 8 影像中分辨率均为 30 m 的 B3 (Green) 和 B5 (NIR) 波段进行水域范围提取。由于洞庭湖水域范围沿经向跨越多景 Landsat 8 影像, 因此无法获取同一天内覆盖洞庭湖全区的观测影像。将 Landsat 8 轨道号 (Path/Row) 为 123/40 和 124/40 的两景影像镶嵌才可以完整覆盖洞庭湖, 但这两景影像获取时间间隔最少为 16 d。本研究使用 Landsat 8 影像主要是为了联合 Sentinel-1、Sentinel-2 和 Landsat 8 等构建卫星虚拟星座进行湖泊水体密集时间序列

变化观测的讨论，故而关于 Landsat 8 影像的重建湖泊面积的内容仅在 5.2 节的讨论中出现。

3 研究方法

3.1 基于 Sentinel-1 雷达影像提取水域面积

在 Sentinel-1 雷达影像中，由于水体反射率更弱，水体呈黑色或颜色较暗区别于非水域。为了提高非水体和水体的差异，将 SAR 影像的灰度值数据转换成以 dB 为单位的后向散射系数（陈赛楠和蒋弥，2021；Li 等，2020）。接着，根据日期和研究范围筛选影像之后，采用 7×7 像素的 Gamma—Map 滤波窗口来降低散斑噪声并保留图像边缘信息。该滤波方法已经可以通过 GEE 云平台实现。对于 VV 极化图像，后向散射系数 < -18—15 dB 或更低的像素被认为是水体（Markert 等，2020；Manjusree 等，2012）。SAR 影像中地物的灰度值和邻域的散射特征有关，易受水中植被的影响，后向反射信息混杂。Edge Otsu 算法是为每个场景生成唯一阈值的理论，最初由 Donchyts 等（2016）提出。该算法采用 Canny Edge filter 强调元素索引，提取图像的边缘特征，进行地物之间的分类（Setiawan 等，2017）。为了更加准确的提取每一景 Sentinel-1 影像中的水体范围，本研究采用 Edge Otsu 算法计算自适应阈值提取水体。

3.2 基于 Sentinel-2 和 Landsat 8 光学影像提取水域面积

本研究采用 McFeeters（1996）提出的应用范围较广的归一化差异水体指数（NDWI）提取洞庭湖水域范围，NDWI 表达式如式（1）所示。通过水体反射率最大的绿色波段和水体反射率最小的近红外波段之间的比值，有效增强了非水体和水体像元之间的差异。通常情况下，NDWI 提取水体像素选择 0 作为分割阈值（NDWI>0 为水体，NDWI<0 为非水体），但是由于地物类型复杂，水体和其他地物之间的分割阈值不稳定，实际应用中需要根据情况对阈值做出调整。因此，本研究采用 3.1 节中提到的 Edge Otsu 算法计算水体提取的自适应阈值，更准确地提取出水体范围。具体计算公式如下：

$$NDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{NIR}}{\rho_{Green} + \rho_{NIR}} \quad (1)$$

式中， ρ_{Green} 为光学影像在绿光波段的反射率， ρ_{NIR}

为光学影像在近红外波段的反射率。

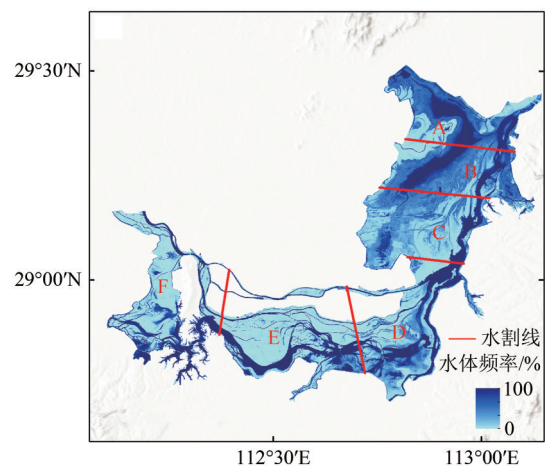
3.3 联合 Sentinel-1/2 影像重建更密集的湖泊水域面积时间序列

经过洞庭湖的 Sentinel-1 F 和 Sentinel-1 P 影像数量相近，但 Sentinel-1 P 影像不能完整覆盖洞庭湖，导致无法对洞庭湖的水体动态变化进行密集监测。而 Sentinel-2 光学影像容易受到云、云阴影或冰的影响，这导致在整个洞庭湖区域完成湖泊水体的提取是具有挑战的。为了充分利用 Sentinel-1/2 的清晰影像估算完整湖泊面积，本研究提出了一种根据湖面局部区块面积和全湖总面积之间的拟合关系的方法，以重建洞庭湖区域 Sentinel-1 P 影像和部分云遮盖影响的 Sentinel-2 影像对应监测日期的完整湖泊面积。该方法分为 4 个步骤，具体如下：首先，对 2017 年—2020 年 Sentinel-1 F 影像提取的水体淹没范围（栅格类型）进行叠加计算，生成洞庭湖水体频率图。其次，对于 Sentinel-1 P 影像，将其覆盖范围作为局部区块提取面积（图 2（c））；对于 Sentinel-2 影像，根据水体频率图和湖区（东、南、西洞庭湖）分布特征，将洞庭湖划分为 6 个区块，用于提取 Sentinel-2 清晰影像对应的水域面积，各区块位置如图 2（a）所示。再次，基于 Sentinel-1 F 影像提取的湖泊区块面积和总面积构建统计拟合模型。拟合曲线为一次线性函数和二次多项式函数两种形式。最后，结合从部分可用的 Sentinel-1/2 影像中提取的区块面积和回归拟合模型，重建与该区块观测时间对应的完整湖泊面积数据。当 Sentinel-1 和 Sentinel-2 影像出现在同一天时，面积数据保留的顺序为 Sentinel-1 提取的淹没面积（Sentinel-1 F）> Sentinel-2 提取的淹没面积（Sentinel-2 F）> Sentinel-1 区块面积重建的淹没面积（Sentinel-1 P）> Sentinel-2 区块面积重建的淹没面积（Sentinel-2 P）。最后，将所有基于 Sentinel-1 和 Sentinel-2 提取的淹没面积和拟合面积进行联合，构建洞庭湖密集面积时间序列。

由于不同区块与总湖泊面积呈现出不同的拟合关系，本研究在进行区块拟合时的判断标准是优先保留 R^2 值大的区块对应的拟合结果。如果遇到 R^2 值相同的情况，则优先保留由一次线性函数模型拟合的湖泊面积结果。另外，对于 Sentinel-2 影像来说，需要注意的划分原则如下：（1）每个区块中应充分包含水体频率介于 0—100% 的所有

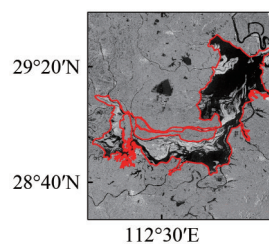
像元,以便更好地表征局部湖区与全湖水体淹没范围联动变化特征;(2)每个局部区块的大小应该至少占湖泊总面积的10%,因为如果区块过大,仍然会导致获取无云遮盖区块 Sentinel-2 影像较难,而如果范围设置过小,区块面积难以客观刻画随整个湖区水域面积变化而变化的信息,统计

拟合模型可用性降低。在本研究中,区块 A、B 和 C 位于东洞庭湖, D 和 E (形似河流的区域不包括在 E 区块内) 位于南洞庭湖, F 位于西洞庭湖, 分别占湖泊总面积的 14%、15%、18%、18% 和 17%。G 区块位于 Sentinel-1 P 覆盖的洞庭湖区域, 占湖泊总面积的 64%。

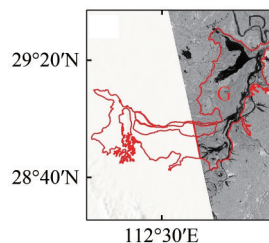


(a) 水体频率图和用于 Sentinel-2 影像的各区块位置, 标记为 A—F

(a) The water frequency map and the location of the blocks used for the Sentinel-2 imagery, labeled A—F



(b) 2019 年 7 月 24 日 Sentinel-1 F 影像
(b) Sentinel-1 F image from July 24, 2019



(c) 2019 年 9 月 29 日 Sentinel-1 P 影像和用于 Sentinel-1 P 的区块位置, 标记为 G
(c) Sentinel-1 P image from September 29, 2019 and the block location used for Sentinel-1 P imagery, labeled G

图 2 用于 Sentinel-1/2 影像面积重建的洞庭湖各区块位置

Fig. 2 Location of each block for the area reconstruction of the Sentinel-1/2 image in Dongting Lake

3.4 精度评定

为验证 Sentinel-1 和 Landsat 8 影像的分类精度, 通过目视解译将 Sentinel-2 影像提取的湖泊水体范围作为地面真实的对比数据。由分类图的交叉对照样本数和参考数据组成的混淆矩阵, 最常用来说明分类的准确性 (Steinhausen 等, 2018)。本研究创建二分类混淆矩阵, 选取 4 个归一化系数进行水体提取精度评估, 分别为生产者精度 (PA)、用户精度 (UA)、总体分类精度 (OA) 和 Kappa 系数。

4 结果与分析

4.1 基于 Sentinel-1 影像的洞庭湖水体面积时间序列变化特征

基于 Sentinel-1 影像的 2017 年—2020 年洞庭湖的水域面积变化具有明显的年内和年际特征, 如图 3 所示。可见: 4—9 月为丰水期, 10 月—次年 3 月为枯水期, 水域面积在 646.15—2264.09 km² 波动; 由

于季风气候的影响, 7 月洞庭湖的水域面积明显扩大; 湖泊水域面积变化也存在明显的年际波动, 2017 年和 2020 年的水域面积较大, 2018 年和 2019 年的水域面积较小。利用 10 m 分辨率的 Sentinel-1 影像提取的湖泊水体, 能够尽可能地提取出湖区的细小水体, 对水域范围的刻画更加精确。观测到的最小水域面积是在 2017 年 12 月 25 日 (图 3 (b))。可见, 仅通过几个狭窄弯曲的河道连接着湖泊。最大的水域面积出现在 2020 年 7 月 30 日 (图 3 (c))。可见, 重新连接了所有的洪泛区, 形成了一个水面连续的大湖。最大水域面积与最小水域面积之比为 3.50。12 d 后, 面积扩张最快的为 369.23 km², 从 2018 年 6 月 23 日的 955.77 km² 到 2018 年 7 月 5 日的 1325.00 km², 变化率达到 39.63%; 面积下降最快的是 439.83 km², 从 2019 年 8 月 29 日的 1175.10 km² 到 2019 年 9 月 10 日的 735.27 km², 变化率达到 59.82%。这些监测结果能够更清晰地解释洞庭湖的动态变化, 为快速水文监测的应用提供了参考。

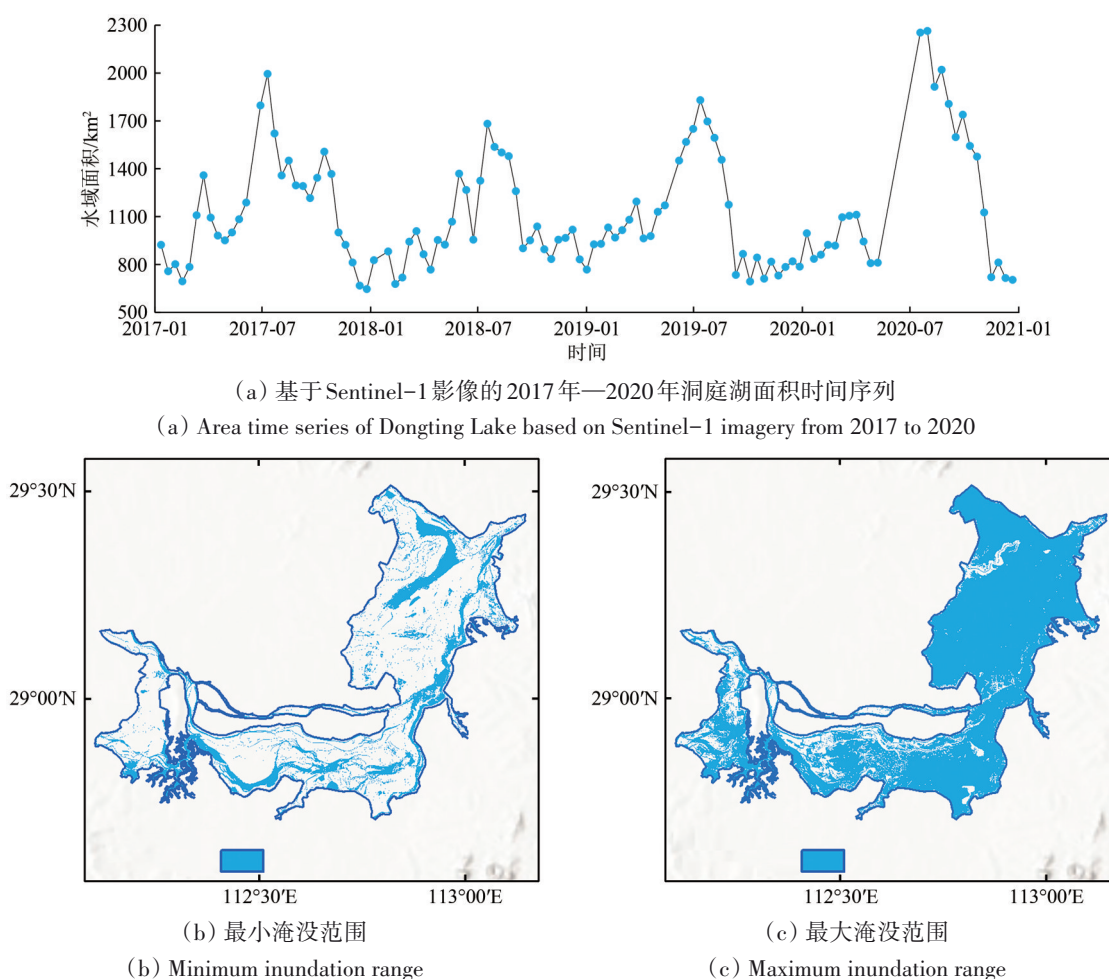


图 3 基于 Sentinel-1 影像的 2017 年—2020 年洞庭湖水体淹没面积时间序列

Fig. 3 Time series of inundation area in Dongting Lake based on Sentinel-1 images from 2017 to 2020

4.2 联合 Sentinel-1/2 影像的密集湖泊面积时间序列重建分析

基于洞庭湖区域 Sentinel-1 构建的水体频率图和湖区分布特征，用于重建部分清晰 Sentinel-1/2 影像对应洞庭湖区域的各区块位置和大小如图 2 所示。各区块面积与总面积的拟合曲线呈显著正相关关系 ($P < 0.01$)，区块 A、B、C、D、E、F、G 的拟合 R^2 值分别为 0.97、0.96、0.96、0.98、0.89、0.81、0.99 (图 4)。拟合曲线包括两种类型，即线性函数 (C、D、G) 和二次多项式函数 (A、B、E、F)。对于用于 Sentinel-2 影像的各区块来说，F 区块与总面积的相关性较弱，这可能主要是由于西洞庭湖永久水面积所占比例较小，大部分拟合点聚集在图 4 (F) 的左下角；D 区块主要包含连接东洞庭湖和南洞庭湖的河道，始终处于永久水所占比例较大的状态，与总面积的拟合系数 R^2 值最高，为 0.98。各区块的平均 R^2 值为 0.94，表明所

提出的区块拟合方法能够较好地重建洞庭湖的完整水域面积时间序列。

在本研究中，119 景 Sentinel-1 影像和 38 景 Sentinel-2 影像用于提取区块面积借助由拟合关系建立的经验模型重建湖泊完整面积。此外，在 2017 年—2020 年，38 景 Sentinel-2 影像可用于提取洞庭湖完整面积。虽然 Sentinel-2 影像数量较少，但面积时间序列的变化趋势与 Sentinel-1 影像相同。因此，Sentinel-1 和 Sentinel-2 影像可以结合，对洞庭湖进行更深入的观测。将完全提取的湖泊面积与借助区块拟合的面积数据相结合，构建基于 Sentinel-1/2 的水域面积密集时间序列，详见图 5。加密后，一个月内可用观测影像平均有 6 景，一个月观测次数最多有 10 景，时间间隔为 3—6 d。一个月内洞庭湖地表水域面积也是相当剧烈，如图 5 (b) 所示。可见：一个月内最大面积与最小面积的平均比率为 1.36；地表水域最剧

烈的波动发生在11月, 比率为1.52。此外, 地表水月均面积7月最大为1874.68 km², 12月最小为745.23 km²。2017年—2020年洞庭湖平均水域面积为1147.13 km²。与4.1节基于Sentinel-1影像提取的洞庭湖水体面积变化相比, 充分利用所有可用

Sentinel-1和Sentinel-2影像提取的水体面积变化可将水体观测的时间分辨率由12 d提高到3—6 d。洞庭湖具有高频波动的特点, 密集时间序列的构建对于水资源管理具有深远的意义。

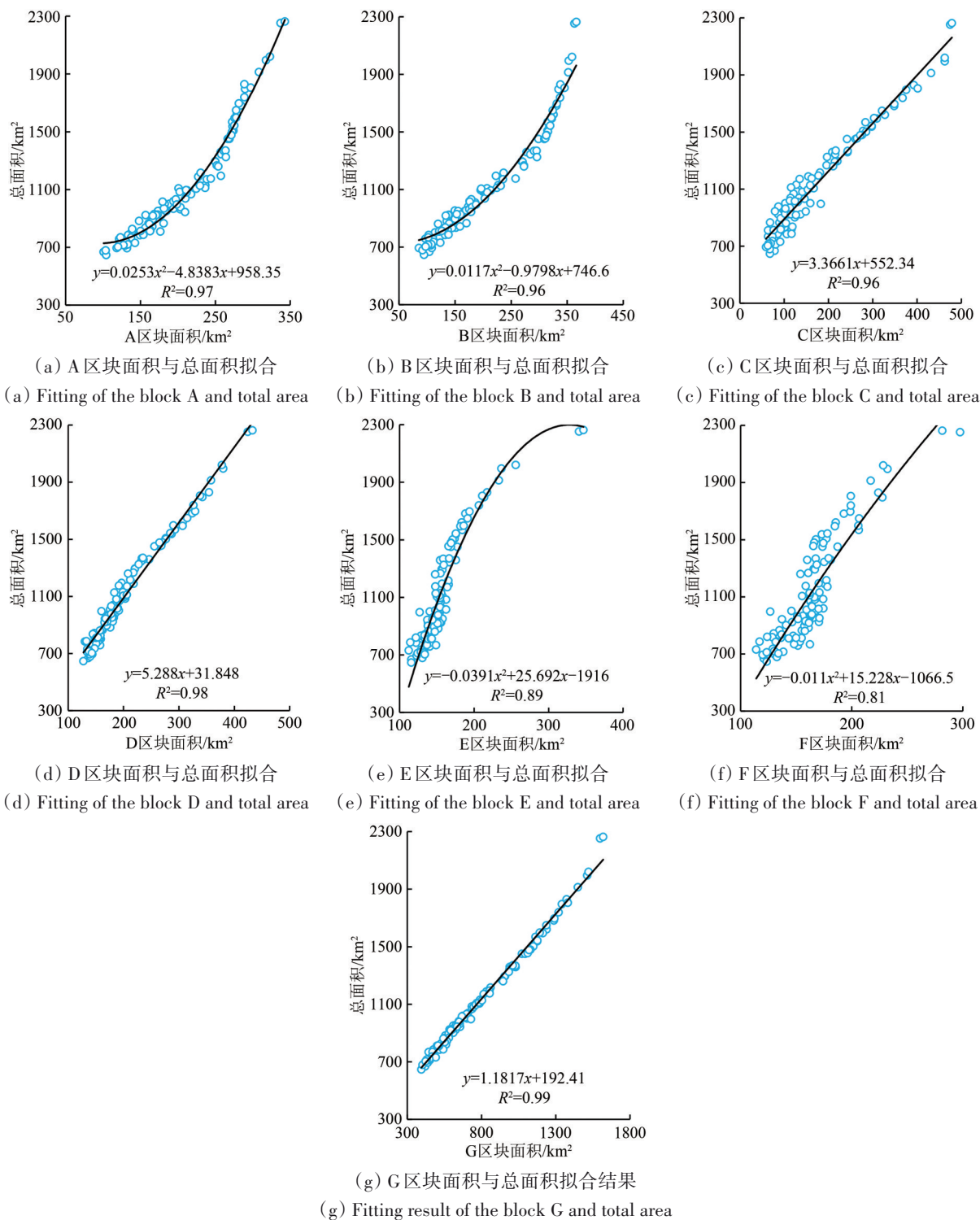
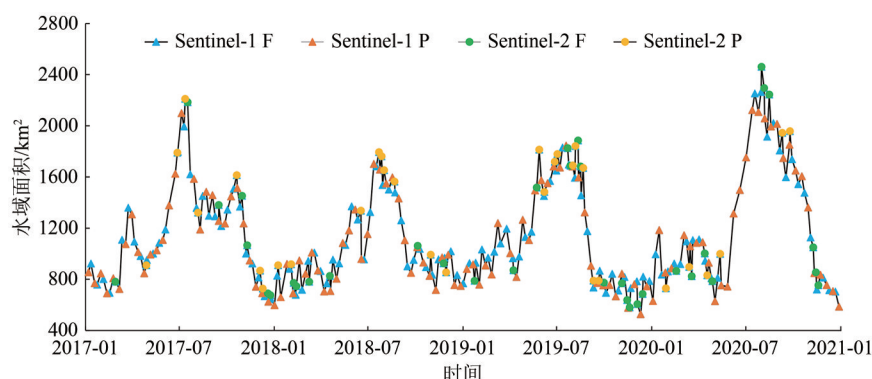


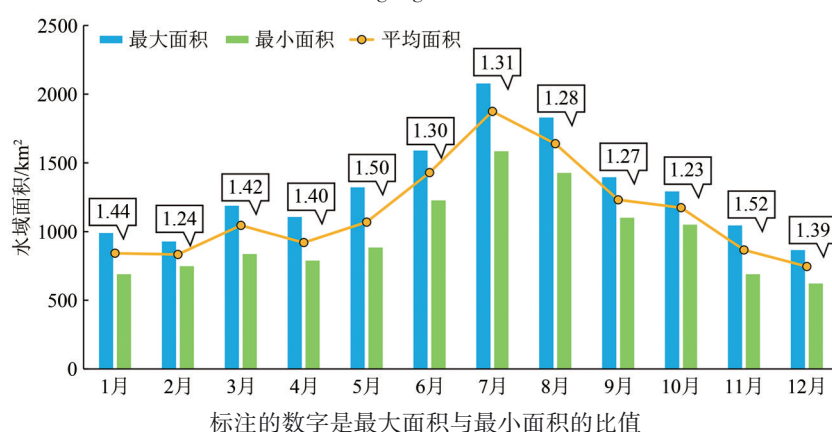
图4 用于重建部分可用Sentinel-1/2影像对应洞庭湖面积的每个区块面积和湖泊总面积的7条拟合曲线

Fig. 4 Seven fitting curves of the block and total lake area corresponding to the area reconstruction of Dongting Lake for partial clear Sentinel-1/2 image



(a) 基于 Sentinel-1 和 Sentinel-2 的洞庭湖密集面积时间序列

(a) Intensive area time series of Dongting Lake based on Sentinel-1 and Sentinel-2



标注的数字是最大面积与最小面积的比值

The number labeled as the ratio of the maximum area to the minimum area

(b) 洞庭湖地表水各月最大、最小和平均面积

(b) Monthly maximum, minimum and average area of surface water in Dongting Lake observed for each month

图5 结合所有可用 Sentinel-1/2 影像的 2017 年—2020 年洞庭湖水域面积密集时间序列

Fig. 5 Density time series of water area in Dongting Lake combined with all available Sentinel-1/2 images from 2017 to 2020

4.3 洞庭湖季节性空间分布变化特征分析

基于 Sentinel-1 影像的 2017 年—2020 年洞庭湖各月水体淹没频率变化,如图 6 所示。由图 6 可知,洞庭湖的水域面积存在明显的年内变化。6—8 月处于丰水期,东、西、南洞庭湖相互连接,形成一个连续的湖面,而在枯水期 12 月—次年 2 月只有几条细窄的河道和东洞庭湖的“钳形”湖泊。各月水体淹没频率变化的主要特征是从湖区中心河道到两侧水体淹没频率逐渐减小,湖区内深蓝色是年内永久水域(包括流入湖中的河流支流和湖泊的稳定部分),白色区域是年内非水域,其他区域颜色由浅蓝到深蓝属于季节性水域。永久水域面积为 580.50 km²,占洞庭湖总面积的 21.29%;非水域面积占比最小,面积为 246.56 km²;季节性水域面积占比最大,面积为 1899.94 km²。永久水域和非水域在年内不会发生水陆性质变化,洪水

风险较低;而季节性水域淹没风险较高,应提前做好防洪准备。此外,洞庭湖水域变化特征表现出明显的区域差异,季节性水域变化大多发生在东和南洞庭湖,西洞庭湖水域空间范围相对稳定。

5 讨论

5.1 洞庭湖面积提取结果的精度验证

在洞庭湖区域内生成 1000 个随机样本点,利用相同或相近观测日期的 Sentinel-2 光学影像人工解译结果对基于 Sentinel-1 和 Landsat 8 影像提取的水体结果进行精度验证。选取 10 幅影像进行验证(5 幅 Sentinel-1 影像和 5 幅 Landsat 8 影像),定量精度评价结果如表 2 所示。用于精度评估的 Sentinel-1、Sentinel-2 和 Landsat 8 影像之间的时间差 ≤ 2 d,可在一定程度上避免由于获取时间不一致导致的水体提取结果差异。对于 Sentinel-1 的精度评

价结果, 平均PA值和平均UA值比较接近, 分别为88.19%和89.75%。洞庭湖区域平均OA值为94.04%, Kappa系数为0.85。对于Landsat 8的精度评价结果, 平均PA值和平均UA值分别为83.67%和97.18%。洞庭湖区域平均OA值为94.22%,

Kappa系数为0.86。水体提取的偏差主要发生在少数细小水体和陆地—水体边界处。OA和Kappa系数的高精度验证了动态地表水面积提取方法的可行性和有效性, 说明基于Sentinel-1和Landsat 8影像提取的水体结果是理想的。

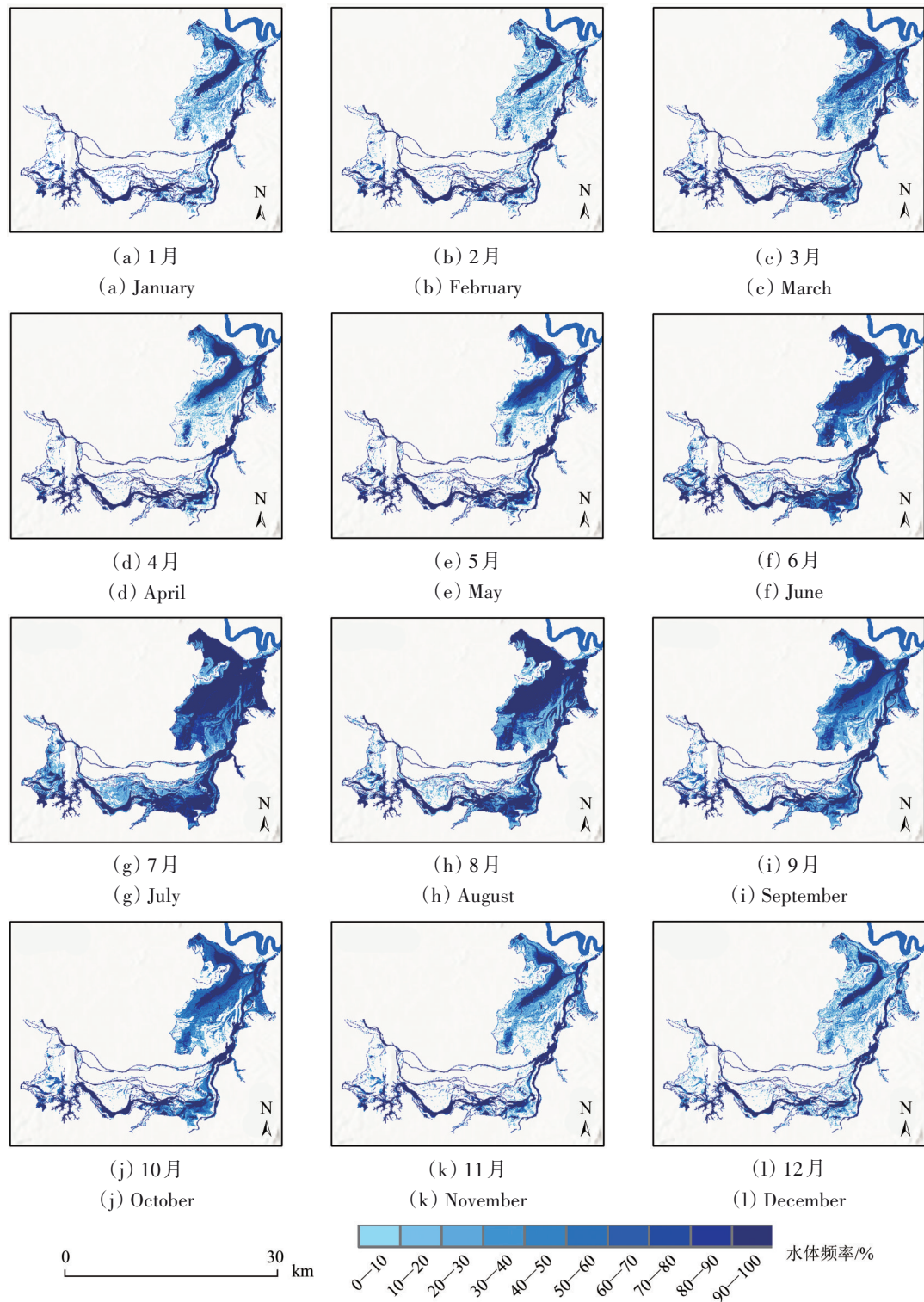


图6 基于Sentinel-1影像的洞庭湖区域各月水体频率分布图

Fig. 6 Map of monthly water frequency distribution in Dongting Lake based on Sentinel-1 images

表2 混淆矩阵用于洞庭湖水体提取算法的精度评价

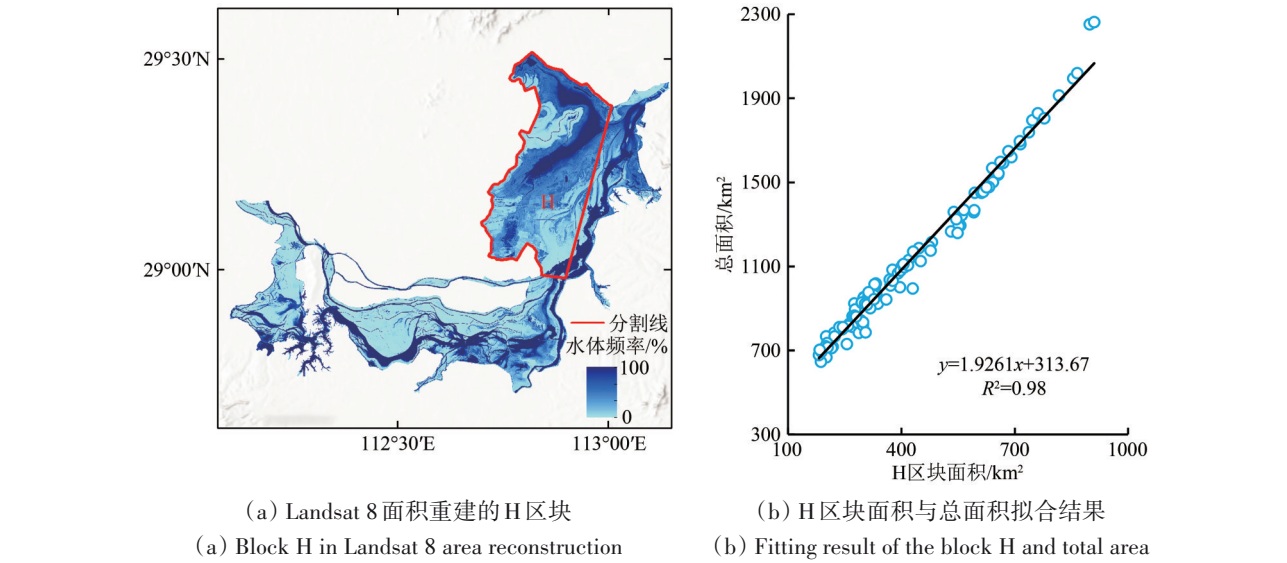
Table 2 Accuracy evaluation of the confusion matrix applied to the water extraction algorithm in Dongting Lake

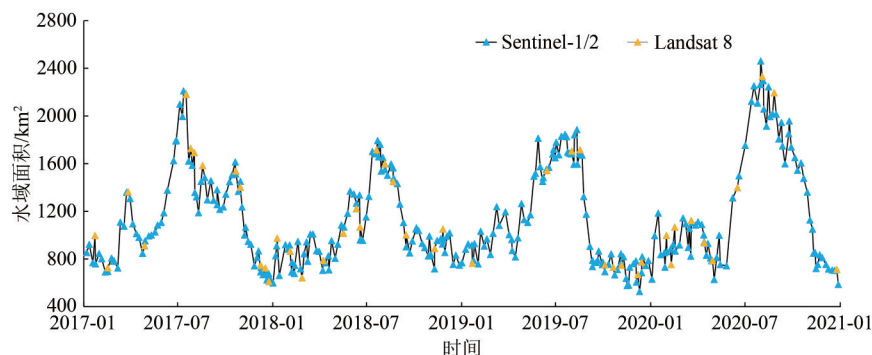
卫星	日期	PA/%	UA/%	OA/%	Kappa 系数	时间差/d
Sentinel-1	2017-02-28	86.97	89.82	93.50	0.84	1
	2017-12-25	85.48	92.98	94.80	0.86	1
	2018-02-11	88.52	94.09	95.40	0.88	1
	2019-01-25	93.19	81.50	92.20	0.81	2
	2020-04-25	89.93	90.24	94.30	0.86	2
Landsat 8	2017-10-30	91.87	98.40	94.20	0.88	0
	2017-12-17	78.75	95.45	94.00	0.83	2
	2019-11-05	86.78	97.67	96.30	0.90	1
	2020-04-13	80.38	97.39	91.90	0.82	1
	2020-04-29	80.58	97.01	94.70	0.85	2

5.2 联合 Landsat 8 影像补充洞庭湖水域面积时序分析

光学遥感卫星容易受云雾天气的影响，尤其是洪水期间，无法获取完整覆盖洞庭湖区域的影像。由 Sentinel-1、Sentinel-2 和 Landsat 8 等卫星可以构成卫星虚拟星座，对洞庭湖区域进行密集时间序列观测。本研究为了讨论结合 Landsat 8 影像进行洞庭湖面积时间序列加密观测的可行性，对2017年—2020年经过洞庭湖区域的Landsat 8影像进行筛选和部分区块水域面积计算，共有 48 景 Landsat 8 影像可以提取局部洞庭湖面积并用于重建完整湖泊面积。根据 Landsat 8 在洞庭湖的分布规律和洞庭湖水体频率图，重新确定一个新的区块拟合模型用于 Landsat 8 影像提取区块面积拟合完整湖泊面积，如图 7（a）所示。将4.2节构建的 Sentinel-1/2 面积时间序列（蓝色）和 Landsat 8 重

建的面积时间序列（黄色）相结合，构建密集时间序列，如图 7（c）所示。虽然 Landsat 8（30 m）和 Sentinel-1/2（10 m）的空间分辨率不同，但是其估算的水体面积变化趋势与 Sentinel-1/2 保持一致。与使用 Landsat 系列卫星进行洞庭湖水域面积变化观测的研究相比，本研究使用的高时空分辨率的哨兵影像可以观测到洞庭湖月内水域面积的动态变化特征（王威 等，2020；Yang 等，2020；崔亮 等，2015）。此外，Landsat 8 影像与 Sentinel-1/2 影像分布日期不同，与 Sentinel-1/2 结合进行密集时间序列的构建，可以更加详细地研究洞庭湖区域水体动态变化特征。与基于 Sentinel-1 和 Sentinel-2 影像提取的洞庭湖水体面积变化相比，结合 Landsat 8 影像的水体面积变化可在某些月将水体观测的时间分辨率提高，但是对于水体面积的月内均值和年平均值变化影响不大。





(c) 洞庭湖水域面积时间序列

(c) Time series of inundated area of Dongting Lake

图7 联合 Sentinel-1/2 和 Landsat 8 的洞庭湖水域面积密集时间序列

Fig. 7 Intensive time series of Dongting Lake inundated area by joint Sentinel-1/2 and Landsat 8

Landsat 系列卫星是持续时间最长的对地球观测光学遥感卫星, 对于湖泊水域面积变化的研究具有重要价值 (Wulder等, 2019)。已有研究表明, 将 Landsat 8、Sentinel-2A 和 Sentinel-2B 结合可提供全球平均重访周期为 2.9 d 的影像数据, 开辟了高时空水体动态变化研究的可能性 (Wulder等, 2019; Li 和 Roy, 2017)。NASA/USGS Landsat 团队和 ESA Sentinel-2 团队成员合作证明了 Landsat 8 OLI 和 Sentinel-2 MSI 影像提取各类地物提取结果在它们各自的不确定性范围内 (Barsi等, 2018; Pahlevan等, 2018)。Landsat 9 卫星被放置在与 Landsat 8 卫星相差 8 d 的轨道上, 以增加观测的时间覆盖范围。随着 2021 年 9 月 27 日发射的 Landsat 9 的加入, 构建的卫星虚拟星座将变得周期更短, 提供接近 2 d 时间间隔的影像。根据本研究提出的借助区块面积拟合湖泊完整水域面积的方法可以最大限度的利用雷达和光学遥感影像, 为开展湖泊水体高时空监测提供可能。

6 结 论

本研究首先基于高时空分辨率的 Sentinel-1 SAR 影像, 构建了 2017 年—2020 年洞庭湖水域面积密集时间序列, 时间分辨率为 12 d。为了提升洞庭湖水体面积动态变化监测频率, 充分利用部分可用的 Sentinel-1/2 影像, 发展了一种借助湖泊局部区块面积重建完整湖区面积的方法。因此, 联合 Sentinel-1 和 Sentinel-2 观测, 为更精细地监测洞庭湖年内和年际水体变化特征。根据水体频率图划分的洞庭湖 7 个局部区块面积与整个湖泊总面积可获得良好的统计相关性, 平均拟合 R^2 为 0.94。

从 2017 年—2020 年, 共有 119 景 Sentinel-1 影像和 38 景 Sentinel-2 影像可用于提取洞庭湖区块完整水体淹没范围, 从而重建整个湖区面积。通过联合 Sentinel-1/2 的面积数据, 研究区洞庭湖的月度可用观测影像平均为 6 景, 时间间隔为 3—6 d, 某些月高达 10 余次监测, 可以更为精细地刻画洞庭湖的水文动态。本研究构建了洞庭湖 2017 年—2020 年高时空分辨率的水域淹没面积时间序列, 结果表明在洞庭湖水域面积具有显著的季节性波动和年际变化。年尺度上, 面积较大的是 2017 年和 2020 年, 较小的是 2018 年和 2019 年; 月尺度上, 洞庭湖的丰水期为 4 月至 9 月, 枯水期为 10 月至次年 3 月。水域面积在 7 月达到峰值, 11 月至 2 月达到谷值。一个月最大面积与最小面积的平均比率为 1.36。地表水域最剧烈的波动发生在 11 月, 最大/最小比率为 1.52。总之, 2017 年—2020 年, 洞庭湖的平均水域面积为 1147.13 km²。与基于 Sentinel-1/2 影像构建的洞庭湖水体面积变化相比, 结合 Landsat 8 影像的水体面积变化可在某些月可以将水体观测的时间分辨率提高, 但是对于水体面积的月均值和年均值影响不大。

该研究为在缺乏完整影像数据的情况下, 充分利用多源遥感数据重建兼具高空间分辨率与高频信息的湖泊水域面积密集时间序列, 提供一种有效途径。该方法能够更为精细地监测湖泊水体淹没范围的动态变化, 未来研究将尝试拓展该方法应用到区域尺度湖泊水域面积变化遥感监测。

志 谢 本研究使用的数据来源于 Google Earth Engine 平台, 在此表示衷心的感谢!

参考文献 (References)

- Barsi J A, Alhammoud B, Czapla-Myers J, Gascon F, Haque M O, Kaewmanee M, Leigh L and Markham B L. 2018. Sentinel-2A MSI and Landsat 8 OLI radiometric cross comparison over desert sites. *European Journal of Remote Sensing*, 51(1): 822-837 [DOI: 10.1080/22797254.2018.1507613]
- Cai X B, Feng L, Hou X J and Chen X L. 2016. Remote sensing of the water storage dynamics of large lakes and reservoirs in the Yangtze River Basin from 2000 to 2014. *Scientific Reports*, 6: 36405 [DOI: 10.1038/srep36405]
- Chen S N and Jiang M. 2021. Application research of Sentinel-1 SAR in flood range extraction and polarization analysis. *Journal of Geo-information Science*, 23(6): 1063-1070 (陈赛楠, 蒋弥. 2021. Sentinel-1 SAR在洪水范围提取与极化分析中的应用研究. *地球信息科学学报*, 23(6): 1063-1070) [DOI: 10.12082/dqxkx.2021.200717]
- Cheng G, Li D, Wang Y and Kang T T. 2015. Water area change of Dongting lake based on landsat data and its affecting factors analysis. *Journal of Irrigation and Drainage*, 34(S1): 246-249 (成功, 李丹, 王勇, 康婷婷. 2015. 基于 Landsat 数据的洞庭湖水域面积变化及其原因分析. *灌溉排水学报*, 34(S1): 246-249) [DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2015.z1.059]
- Cui L, Li Y P, Huang G H and Zeng X T. 2015. Dynamic changes of Dongting Lake based on Landsat-TM remote sensing data. *South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology*, 13(1): 63-66, 107 (崔亮, 李永平, 黄国和, 曾雪婷. 2015. 基于 Landsat-TM 影像的洞庭湖水面积动态变化. *南水北调与水利科技*, 13(1): 63-66, 107) [DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2015.01.015]
- Donchyts G, Schellekens J, Winsemius H, Eisemann E and van de Giesen N. 2016. A 30 m resolution surface water mask including estimation of positional and thematic differences using landsat 8, SRTM and OpenStreetMap: a case study in the Murray-Darling Basin, Australia. *Remote Sensing*, 8(5): 386 [DOI: 10.3390/rs8050386]
- Drusch M, Del Bello U, Carlier S, Colin O, Fernandez V, Gascon F, Hoersch B, Isola C, Laberinti P, Martimort P, Meygret A, Spoto F, Sy O, Marchese F and Bargellini P. 2012. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120: 25-36 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.11.026]
- Du T, Xiong L H, Yi F H, Xiao Y and Song Q M. 2012. Relation of the water area of Dongting Lake to the water levels of hydrological stations based on MODIS images. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 21(6): 756-765 (杜涛, 熊立华, 易放辉, 肖义, 宋求明. 2012. 基于 MODIS 数据的洞庭湖水体面积与多站点水位相关关系研究. *长江流域资源与环境*, 21(6): 756-765)
- Gao Y, Xie Y H, Zou D S, Hou T J and Li Z Z. 2019. Changes and driving factors of water surface area for inner lakes in Lake Dongting district in the past 40 years. *Journal of Lake Sciences*, 31(3): 755-765 (高耶, 谢永宏, 邹冬生, 侯婷娟, 李正最. 2019. 近 40 年洞庭湖区内湖水面积变化及其驱动因素. *湖泊科学*, 31(3): 755-765) [DOI: 10.18307/2019.0314]
- Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D and Moore R. 2017. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202: 18-27 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031]
- Huang J M, Zou Y C, Cai H C, Tan H and Yu Y. 2013. Change characteristics of the air temperature during the past 60 a over Dongting Lake area. *Journal of the Meteorological Sciences*, 33 (04): 457-463 (黄菊梅, 邹用昌, 蔡海朝, 覃鸿, 喻宇. 2013. 近 60a 来洞庭湖区气温的变化特征. *气象科学*, 33(04): 457-463) [DOI: 10.3969/2012jms.0102]
- Li J and Roy D P. 2017. A global analysis of Sentinel-2A, Sentinel-2B and Landsat 8 data revisit intervals and implications for terrestrial monitoring. *Remote Sensing*, 9(9): 902 [DOI: 10.3390/rs9090902]
- Li J, Zhang W and Xu X. 2020. Information extraction and analysis of food disaster in Dongting Lake area base on Sentinel-1. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 26(19): 151-153 (李军, 张维, 许欣. 2020. 基于 Sentinel-1 的洞庭湖区洪涝灾害信息提取与分析. *安徽农学通报*, 26(19): 151-153) [DOI: 10.16377/j.cnki.issn1007-7731.2020.19.063]
- Li J G, Li J R, Huang S F and Zang W B. 2010. The remote sensing monitoring analysis of Chinese Dongting Lake water area variations in last 10 years using Terra/MODIS data time series. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 8(3): 201-207 (李景刚, 李纪人, 黄诗峰, 臧文斌. 2010. 近 10 年来洞庭湖区水面面积变化遥感监测分析. *中国水利水电科学研究院学报*, 8(3): 201-207) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-3031.2010.03.008]
- Li J G, Li J R, Huang S F and Zuo C G. 2009. Application of Terra/MODIS time series data in dynamic monitoring of lake water area variations: a case study in Dongting Lake region, China. *Journal of Natural Resources*, 24(5): 923-933 (李景刚, 李纪人, 黄诗峰, 左春刚. 2009. Terra/MODIS 时间序列数据在湖泊水域面积动态监测中的应用研究——以洞庭湖地区为例. *自然资源学报*, 24(5): 923-933) [DOI: 10.3321/j.issn:1000-3037.2009.05.020]
- Li J J, Wang C, Xu L, Wu F, Zhang H and Zhang B. 2021. Multitemporal water extraction of Dongting Lake and Poyang Lake based on an automatic water extraction and dynamic monitoring framework. *Remote Sensing*, 13(5): 865 [DOI: 10.3390/rs13050865]
- Li Y, Martinis S, Plank S and Ludwig R. 2018. An automatic change detection approach for rapid flood mapping in Sentinel-1 SAR data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73: 123-135 [DOI: 10.1016/j.jag.2018.05.023]
- Li Y, Niu Z G, Xu Z Y and Yan X. 2020. Construction of high spatial-temporal water body dataset in China based on Sentinel-1 archives and GEE. *Remote Sensing*, 12(15): 2413 [DOI: 10.3390/rs12152413]
- Li Y L, Zhang Q, Lu J R, Yao J and Tan Z Q. 2019. Assessing surface water-groundwater interactions in a complex river-floodplain wetland-isolated lake system. *River Research and Applications*, 35(1): 25-36 [DOI: 10.1002/rra.3389]
- Loveland T R and Irons J R. 2016. Landsat 8: the plans, the reality, and the legacy. *Remote Sensing of Environment*, 185: 1-6 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.07.033]
- Ma R H, Yang G S, Duan H T, Jiang J H, Wang S M, Feng X Z, Li A N, Kong F X, Xue B, Wu J L and Li S J. 2011. China's lakes at present: number, area and spatial distribution. *Science China Earth Sciences*, 54(2): 283-289 (马荣华, 杨桂山, 段洪涛, 姜加虎, 王苏民, 冯学智, 李爱农, 孔繁翔, 薛滨, 吴敬禄, 李世杰. 2011. 中国湖泊的数量、面积与空间分布. *中国科学: 地球科学*, 41(3): 394-401) [DOI: 10.1360/zd-2011-41-3-394]
- Manjures P, Kumar L P, Bhatt C M, Rao G S and Bhanumurthy V. 2012. Optimization of threshold ranges for rapid flood inundation

- mapping by evaluating backscatter profiles of high incidence angle SAR images. *International Journal of Disaster Risk Science*, 3(2): 113-122 [DOI: 10.1007/s13753-012-0011-5]
- Markert K N, Markert A M, Mayer T, Nauman C, Haag A, Poortinga A, Bhandari B, Thwal N S, Kunlami T, Chishtie F, Kwant M, Phongsapan K, Clinton N, Towashiraporn P and Saah D. 2020. Comparing Sentinel-1 surface water mapping algorithms and radiometric terrain correction processing in Southeast Asia utilizing Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 12(15): 2469 [DOI: 10.3390/rs12152469]
- McFeeters S K. 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7): 1425-1432 [DOI: 10.1080/01431169608948714]
- Pahlevan N, Balasubramanian S V, Sarkar S and Franz B A. 2018. Toward long-term aquatic science products from heritage landsat missions. *Remote Sensing*, 10(9): 1337 [DOI: 10.3390/rs10091337]
- Pekel J F, Cottam A, Gorelick N and Belward A S. 2016. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633): 418-422 [DOI: 10.1038/nature20584]
- Song C Q, Zhan P F and Ma R H. 2020. Progress in remote sensing study on lake hydrologic regime. *Journal of Lake Sciences*, 32(5): 1406-1420 (宋春桥, 詹鹏飞, 马荣华. 2020. 湖泊水情遥感研究进展. *湖泊科学*, 32(5): 1406-1420) [DOI: 10.18307/2020.0514]
- Steinhausen M J, Wagner P D, Narasimhan B and Waske B. 2018. Combining Sentinel-1 and Sentinel-2 data for improved land use and land cover mapping of monsoon regions. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73: 595-604 [DOI: 10.1016/j.jag.2018.08.011]
- Setiawan B D, Rusydi A N and Pradityo K. 2017. Lake edge detection using Canny algorithm and Otsu thresholding. Paper presented at the 2017 International Symposium on Geoinformatics (ISyG), 24-25 Nov. 2017 [DOI: 10.1109/ISyG.2017.8280676]
- European Space Agency. 2015. Sentinel-2 User Handbook. ESA Standard Document Date 1, 1-64.
- Tamiminia H, Salehi B, Mahdianpari M, Quackenbush L, Adeli S and Brisco B. 2020. Google Earth Engine for geo-big data applications: a meta-analysis and systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 164: 152-170 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001]
- Tan Z Q, Xu X L, Li Y L and Zhang Q. 2017. Wetland landscape pattern evolution of large Yangtze-connected lakes in the middle reaches of Yangtze River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 26(10): 1619-1629 (谭志强, 许秀丽, 李云良, 张奇. 2017. 长江中游大型通江湖泊湿地景观格局演变特征. *长江流域资源与环境*, 26(10): 1619-1629) [DOI: 10.11870/cjlyzy-hj201710014]
- Torres R, Snoeij P, Geudtner D, Bibby D, Davidson M, Attema E, Potin P, Rommen B, Floury N, Brown M, Traver I N, Deghaye P, Duesmann B, Rosich B, Miranda N, Bruno C, L'abbate M, Croci R, Pietropaolo A, Huchler M and Rostan F. 2012. GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120: 9-24 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.05.028]
- Twele A, Cao W X, Plank S and Martinis S. 2016. Sentinel-1-based flood mapping: a fully automated processing chain. *International Journal of Remote Sensing*, 37(13): 2990-3004 [DOI: 10.1080/01431161.2016.1192304]
- Vuolo F, Zóltak M, Pipitone C, Zappa L, Wenng H, Immitzer M, Weiss M, Baret F and Atzberger C. 2016. Data service platform for Sentinel-2 surface reflectance and value-added products: system use and examples. *Remote Sensing*, 8(11): 938 [DOI: 10.3390/rs8110938]
- Wang C L, Jiang W G, Deng Y, Ling Z Y and Deng Y W. 2022. Long time series water extent analysis for SDG 6.6.1 based on the GEE platform: a case study of Dongting Lake. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15: 490-503 [DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3088127]
- Wang J D, Sheng Y W and Tong T S D. 2014. Monitoring decadal lake dynamics across the Yangtze Basin downstream of Three Gorges Dam. *Remote Sensing of Environment*, 152: 251-269 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.06.004]
- Wang Q. 2021. Progress of environmental remote sensing monitoring technology in China and some related frontier issues. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(1): 25-36 (王桥. 2021. 中国环境遥感监测技术进展及若干前沿问题. *遥感学报*, 25(1): 25-36) [DOI: 10.11834/jrs.20210572]
- Wang S L, Luo J and Chen Z Q. 2021. Study on relationship between water level and water area based on Google Earth Engine. *Computer Systems and Applications*, 30(6): 238-245 (王诗蕾, 罗晋, 陈泽强. 2021. 基于 Google Earth Engine 的湖泊水位与水体面积关系研究. *计算机系统应用*, 30(6): 238-245) [DOI: 10.15888/j.cnki.csa.007193]
- Wang W, Sui B, Lin N and Chen T L. 2020. Study on area changes of the Dongting lake based on remote sensing data. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 10(3): 128-132 (王威, 隋兵, 林南, 陈太龙. 2020. 基于 Landsat 遥感数据的洞庭湖面积变化研究. *气象科技进展*, 10(3): 128-132) [DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.020]
- Wulder M A, Loveland T R, Roy D P, Crawford C J, Masek J G, Woodcock C E, Allen R G, Anderson M C, Belward A S, Cohen W B, Dwyer J, Erb A, Gao F, Griffiths P, Helder D, Hermosilla T, Hipple J D, Hostert P, Hughes M J, Huntington J, Johnson D M, Kennedy R, Kilic A, Li Z, Lyburner L, Mccorkel J, Pahlevan N, Scambos T A, Schaaf C, Schott J R, Sheng Y W, Storey J, Vermote E, Vogelmann J, White J C, Wynne R H and Zhu Z. 2019. Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*, 225: 127-147 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.02.015]
- Xie W J, Yue C Y and Zhang W. 2017. Study on change of temporal and spatial characteristic of Dongting Lake from 1996 to 2016. *Water Resources Informatization*, (5): 32-38 (谢文君, 岳翠莹, 张文. 2017. 洞庭湖 1996—2016 年时空特征变化研究. *水利信息化*, (5): 32-38) [DOI: 10.19364/j.1674-9405.2017.05.007]
- Xing L W, Tang X M, Wang H B, Fan W F and Wang G H. 2018. Monitoring monthly surface water dynamics of Dongting Lake using Sentinel-1 data at 10 m. *PeerJ*, 6: e4992 [DOI: 10.7717/peerj.4992]
- Yan L, Long D, Bai L L, Zhang C J, Han Z Y, Li X D, Wang W, Shen S H and Ye Y T. 2020. A review on water resources stereoscopic monitoring systems based on multisource data. *Journal of Remote Sensing (Chinese)*, 24(7): 787-803 (岩腊, 龙笛, 白亮亮, 张才金, 韩忠颖, 李兴东, 王文, 申邵洪, 冶运涛. 2020. 基于多源信息的水资源立体监测研究综述. *遥感学报*, 24(7): 787-803) [DOI: 10.11834/jrs.20200123]
- Yang G S, Ma R H, Zhang L, Jiang J H, Yao S C, Zhang M and Zeng H A. 2010. Lake status major problem and protection in China.

- Journal of Lake Sciences, 22(6): 799-810 (杨桂山, 马荣华, 张路, 姜加虎, 姚书春, 张民, 曾海鳌. 2010. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. 湖泊科学, 22(6): 799-810) [DOI: 10.18307/2010.0601]
- Yang K H, Yao F F, Wang J D, Luo J C, Shen Z F, Wang C and Song C Q. 2017. Recent dynamics of alpine lakes on the endorheic Changtang Plateau from multi-mission satellite data. Journal of Hydrology, 552: 633-645 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.07.024]
- Yang L, Wang L C, Yu D Q, Yao R, Li C A, He Q H, Wang S Q and Wang L Z. 2020. Four decades of wetland changes in Dongting Lake using Landsat observations during 1978-2018. Journal of Hydrology, 587: 124954 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124954]
- Yang L, Wang L C, Zhang M, Niu Z G, Yao R, Yu D Q, Li C A and He Q H. 2021. Variation of water body in Dongting Lake from in situ measurements and MODIS observations in recent decades. International Journal of Digital Earth, 14(8): 959-984 [DOI: 10.1080/17538947.2021.1907464]
- Yu S C, Yu D Q, Wang L C, Li C A, He Q H and Xiang F F. 2019. Remote sensing study of Dongting Lake beach changes before and after operation of Three Gorges Reservoir. Earth Science, 44(12): 4275-4283 (余姝辰, 余德清, 王伦澈, 李长安, 贺秋华, 向菲菲. 2019. 三峡水库运行前后洞庭湖洲滩面积变化遥感认识. 地球科学, 44(12): 4275-4283) [DOI: 10.3799/dqkx.2019.182]
- Zhang M, Zeng Y N and Zhu Y S. 2017. Wetland mapping of Dongting Lake Basin based on time-series MODIS data and object-oriented method. Journal of Remote Sensing, 21(3): 479-492 (张猛, 曾永年, 朱永森. 2017. 面向对象方法的时间序列 MODIS 数据湿地信息提取——以洞庭湖流域为例. 遥感学报, 21(3): 479-492) [DOI: 10.11834/jrs.20176129]
- Zhu P, Huang S F, Yang Y M, Ma J W, Sun Y Y and Gao S Y. 2019. High-frequency monitoring of inland lakes water extent using time-series Sentinel-1 SAR data//2019 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing. Chongqing: IEEE: 1-6 [DOI: 10.1109/ICSIDP47821.2019.9173066]

High spatial and temporal resolution monitoring of water area changes of Dongting Lake by joint Sentinel satellite series of radar and optical images

SONG Lijuan^{1,2}, JING Haitao¹, XU Jiahui^{1,2}, CHEN Tan², ZHANG Dapeng^{1,2}, SONG Chunqiao²

1. College of Surveying and Geotechnical Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

Abstract: Dongting Lake is the second largest freshwater lake in China, and the water body fluctuates greatly and frequently in dry and wet seasons. The high-frequency observation of water body changes in Dongting Lake by satellite is important for timely and accurate monitoring of its hydrological dynamic changes.

This study aims to reconstruct and analyze the elaborate time series information of Dongting Lake water area from 2017 to 2020 by using Sentinel-1 and Sentinel-2 images (10 m) under the condition of high time-frequency and high spatial resolution. In addition, this study develops a method to reconstruct the whole lake water area and encrypt the time series of lake area based on the partially cloudless image of the lake area. This method uses the statistical fitting relationship between the block area and total area extracted from Sentinel-1 full image to establish an empirical model for obtaining a dense time series of Dongting Lake water area.

Fitting results show that the area of each block is significantly positively correlated with the lake total area, and the average R^2 value is 0.94. From 2017 to 2020, 119 Sentinel-1 images and 38 Sentinel-2 images were obtained to extract the block inundation range of Dongting Lake for reconstructing the whole lake area. After all Sentinel-1 and Sentinel-2 images were combined, the average observation images available in each month are 6. In some months, the monitoring times can reach 10 times, and the time interval is 3—6 days. It can conduct fine monitoring of the water area change of Dongting Lake. Besides, the time series of water area reconstructed in this study can accurately describe the significant seasonal fluctuations and interannual changes. The water area reaches the peak in July and the valley from November to February. The average ratio of maximum area to minimum area in a month is 1.36. The most violent fluctuation in surface waters occurred in November, with a ratio of 1.52. After Sentinel-1/2 image observation time series were integrated, the average water area of Dongting Lake from 2017 to 2020 is about 1147.13 km².

Compared with the water area time series of Dongting Lake constructed based on Sentinel-1/2 images, the water area time series combined with landsat-8 image can improve the time resolution of water observation. However, it has little effect on the monthly and annual averages of water area. This study combines sentinel series radar and optical images of high temporal and spatial resolution to develop a fine extraction method of high time-frequency water area series. In summary, this study can provide scientific and technological support for improving remote sensing monitoring and fine management of water resources in Dongting Lake and high dynamic lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River.

Key words: remote sensing monitoring, Dongting Lake, Sentinel, watershed area, time series, Yangtze River Basin

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFD0900804, 2018YFD1100101, 2019YFA0607101); National Natural Science Foundation of China (No. 41971403, 41801321); Thousand Young Talents Program in China (No. Y7QR011001); Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No. XDA23100102)